



# Design and Testing of a Lean Satellite Electrical Power Subsystem, HORYU-IV

著者	Edries Mohamed Yahia
発行年	2016-09-23
その他のタイトル	超小型衛星鳳龍四号の電源サブシステムの設計と試験
学位授与番号	17104甲工第426号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10228/5902">http://hdl.handle.net/10228/5902</a>

氏 名	Mohamed Yahia EDRIES (エジプト)
学位の種類	博 士 (工学)
学位記番号	工博甲第426号
学位授与の日付	平成28年9月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Design and Testing of a Lean Satellite Electrical Power Subsystem, HORYU-IV (超小型衛星鳳龍四号の電源サブシステムの設計と試験)
論文審査委員	主 査 教 授 趙 孟佑 " 奥山 圭一 " 大村 一郎 准教授 豊田 和弘

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

HORYU-IV is a nanosatellite developed in Kyushu Institute of Technology (Kyutech). It was launched to its low earth orbit (LEO) in 2016. The main mission of HORYU-IV is to generate a high voltage by solar arrays and to investigate the resulted phenomenon of arcing due to interaction with the surrounding space environment.

Recently, the abrupt growth of small satellites launches in the range from a 1kg CubeSat to a satellite of 100kg, urge the specialists to propose new development concepts and philosophies in both the manufacturing and the management processes. The aim for these concepts is to give the customers and stakeholders a kind of value to invest more in satellites development, which have good impacts to scientific research. The new term of “lean satellite” perfectly describes any satellite which uses those optimization concepts in its development. Low cost, fast delivery, and risk acceptance are the lean concepts considered during the development of HORYU-IV.

An electrical power subsystem (EPS) is one of the HORYU-IV bus subsystems. The function of the EPS is to provide uninterrupted power to all subsystems during the satellite’s lifetime. High reliability, high efficiency and simplicity are the main requirements to be considered in the design of an EPS. Generally, an EPS consists of solar arrays, rechargeable batteries, and a power control and distribution unit (PCDU). A peak power tracking topology is preferred to extract the maximum power

generated by the solar arrays. The extra energy is stored in nickel-metal hydride batteries.

The aim of this research is to develop an EPS of HORYU-IV satellite based on lean concepts. Those three lean concepts (low cost, fast delivery and risk acceptance) have been applied on design and testing of EPS. The safety requirements by JAXA, efficiency, and reliability have been considered as well. In this research, all the previously mentioned six main goals were considered as the causes of the problem to be solved which was EPS development. Each cause has been analyzed, to more specific actions to be reflected in the design or by testing.

Out of all actions presented in the research, below are examples of the actions taken:

1. Usage of the commercial-off-the-shelf (COTS) components in design to reduce the cost.
2. Overlap between design phases was a managerial action to speed up the EPS delivery.
3. The risk of reducing the scope of some tests was accepted.

The thesis was organized in five chapters. Chapter one comprises an introduction about different topologies of satellites EPS, and what are the advantages and disadvantages of each topology. A literature review of the number of nanosatellites that are developed using each topology is given. In this chapter, the lean concepts were explained thoroughly and how the EPS comply with it either by design or testing.

Chapter two presents description of the various design tools that have been used to design EPS. The illumination prediction tool gives estimation of the generated power. The orbital parameters and satellite attitude control technique are the inputs to that tool. The power budget and models of solar arrays and batteries are also introduced. Last section in that chapter presented the fault tree analysis of EPS and simplified methods for estimation the reliability and efficiency.

Chapter three gives the details of EPS parts. The design of solar arrays, battery, and power condition unit, were presented and how to select the appropriate components values.

Chapter four presents all the tests conducted for verification of the design. Solar arrays have been checked with solar simulator to verify I-V characteristics. The battery screening process, pre-launching preparation, self-discharge rate estimation and change of the internal DC impedance with temperature change, are covered and presented in battery testing section. The PCDU also tested and verified its

operation. Radiation and total ionization dose tests were explained, and what were their impacts on PCDU design.

Chapter five gives analysis of EPS in-orbit data. The operation of the system in space has been verified and the battery temperature rise anomaly has been explained. The last section in this chapter gives the conclusion of the study, what are the lessons learned, and the recommendation for future improvements.

This research revealed that low cost, fast delivery, robustness and reasonable efficiency could be achieved in EPS of HORYU-IV. After testing EPS and in-orbit performance, it is found that using a simple design based on available COTS sub-units with acceptable performance is faster, cheaper and more reliable than building a system from scratch. A peak power tracking (PPT)-controlled battery charge regulator (BCR) and power distribution module (PDM) DC/DC converters are clear examples of the lean concept.

## 学位論文審査の結果の要旨

本論文は、近年急速に開発・利用が進んでいる超小型衛星、特に電源系、の設計と試験に関する研究について述べたものである。近年、1 kg のキューブサットから 100kg の衛星に至る、所謂超小型衛星の打ち上げ数が急激に増えている。そのような状況の中で、超小型衛星の開発やマネジメント手法について新たな概念が求められるようになってきた。その概念とは、衛星のユーザやステークホルダに対して、衛星の価値を、安く早く届けるにはいかにすればよいか、という観点から述べられるべきものであり、“Lean Satellite” という概念が生まれつつある。Lean Satellite とは、従来の信頼性に非常に重きを置いた衛星ではなく、リスクをある程度許容しながらも、安く早く衛星を作り運用することに重きを置いている。九州工業大学では、2016 年に超小型衛星「鳳龍四号」を低軌道に打ち上げたが、同衛星は Lean Satellite の考え方をとりいれて開発が行われた。本論文は、鳳龍四号を例にとり、Lean Satellite の電源系の設計と試験とはいかにあるべきかを論じたものである。

電源系の役割は、衛星の寿命期間を通じて、衛星内の各サブシステムに中断なく電力を供給することにある。高信頼性、高効率、簡便性が電源系の設計において考慮される主な要求事項である。一般的に電源系は、太陽電池アレイ、二次電池、電力制御・分配器によって構成される。低コスト・短納期・リスク許容という Lean Satellite の概念を鳳龍四号の電源系の設計に適用した。一方で、ロケット側からの安全要求・効率・信頼性といったことも考慮した。本論文では、低コスト・短納期・リスク許容・安全要求・効率・信頼性の 6 つの観点から、超小型衛星(Lean Satellite)の電源系設計と試験を論じている。

本論文は5章で構成されている。第1章は、衛星の電源系構成(topology)の分類、各構成の利点・欠点について述べた上で、各構成を採用した超小型衛星についての文献レビューを行っている。その上で、Lean Satellite の概念を紹介し、電源系の設計と試験を Lean Satellite の観点から論じていくという目的を明らかにしている。

第2章は、電源系を設計するための様々な設計ツールについて述べている。日照予測ツールは、軌道要素と衛星姿勢を入力パラメータとして、衛星の発生電力を計算する。太陽電池とバッテリーの電力バジェットについても紹介している。最後に衛星電源系の故障の本解析について述べ、信頼性と効率を見積もるための簡便な方法について述べている。

第3章では、鳳龍四号の電源系の各パーツについて述べている。太陽電池、バッテリー、電力制御器の設計を述べ、各パーツがどのようにして選択されたかを述べている。

第4章では、設計検証のために行われた試験結果について述べている。太陽電池アレイについては太陽光シミュレータを用いて I-V 特性を取得した。バッテリーのスクリーニングプロセス、打ち上げ前の準備、自己放電率の見積もり、内部インピーダンスの温度依存性について述べている。電力制御器については機能試験結果について述べている。放射線試験（シングルイベントとトータルドーズ）についても述べ、電力制御・分配器の設計に対するインパクトについて述べている。

第5章では、鳳龍四号電源系の軌道上データと論文の結論を述べている。宇宙空間において電源系の動作は確認された。同時にバッテリー温度で見られた異常な高温についても説明がなされている。最後に、研究の結論、得られた教訓、将来への提言がなされている。本研究では、低コスト・短納期で堅牢且つ適当な効率をもった電源系を鳳龍四号で達成することができた。電源系の地上試験や軌道上結果から、市場で入手可能な COTS 品に基づいたシンプルな設計にすることで、安く早く且つ信頼性のあるサブシステムにすることができることを示した。鳳龍四号の電源系で採用した最大電力追従方式のバッテリー充電制御と電力配分器用 DC/DC コンバータの組み合わせが Lean Satellite の概念のよい例であることを示した。

上記の論文に対して審査を行い、本研究が超小型衛星の利用拡大や信頼度向上に向けて大きく貢献したことが認められた。審査会・公聴会にてなされた、故障の本解析、軌道上結果の解釈、電源系の効率、各部品の故障率等々の質問にも適切に対処した。本論文作成の過程で証明した研究能力と論文の記述から、本人が博士号を授与されるのに相応しい素養を身に付けていると判断した。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。